A K_{IIC} feszültségintenzitási paraméter kísérleti meghatározása új típusú beton próbatesteken, 1. rész

FEHÉRVÁRI SÁNDOR • DE Műszaki Kar Építőmérnöki Tanszék • Fehervari.Sandor@t-online.hu

GÁLOS MIKLÓS • BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék • mgalos@freemail.hu

SALEM G. NEHME • BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék • sgnehme@yahoo.com

Beérkezett: 2009.09.22. • Received: 22.09.2009. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.2>

Determination of K_{IIC} stress intensity factor on new shape concrete specimens (Part I)

Under load, the number of fissures in concrete or reinforced concrete increases, and such cracks will be the starting points of failure. In order to understand failure of such structures, the analysis of the stress state of crack tips is necessary, which is the subject matter of fracture mechanics. Due to material inhomogeneity and different modular coordination, the fracture analysis of concrete is more complex than the original tests devised for metals. While methods and specimens have been developed for tension failure (type I), the mode of examining shear failure (type II) has not yet been unequivocally established. This paper and its sequels focus on the analysis and test procedures of a new, compact specimen for examining the K_{IIC} strength intensity factor.

1. Bevezetés

A betonban és vasbetonban, az anyag természetéből kifolyólag, terhelés nélkül is repedések, pórusok, „hibahelyek” találhatóak. Terhelés hatására növekszik ezeknek a „hibáknak” a száma. A törésmechanika tárgya az anyagban található repedés körüli feszültségállapot leírása, jellemzése, valamint a repedés továbbterjedéséhez tartozó paraméterek meghatározása. Griffith [1] megállapítása szerint bármely anyag tönkremenetele a benne található hibahelyeknél kezdődik el. Ilyen „hibahely” a betonban található minden repedés, mikrorepedés, megnyílt pórus stb. Az anyag törésmechanikai tulajdonságainak jellemzésére speciális alakú és kialakítású próbatestek vizsgálatával, a diszkrét, előre elkészített repedés (bemetszés) továbbterjedésének elemzésével van lehetőség. Habár eddig több, különböző alakú és méretű próbatestre dolgoztak ki összefüggéseket, betonokra még nincs egyértelműen szabványosított vizsgálati eljárás és meghatározási módszer. A korábbi kutatások, az irodalmi hivatkozások szerint is, rendkívül változatos kialakítással és mérettartománnyal vizsgálták a betonok/vasbetonok (és ide sorolhatjuk a többi kőszerű anyag) törésmechanikai paramétereit.

2. Törésmechanika alapelvek

A feszültségkoncentrációk elemzése és elméleti megoldása a törésmechanika kutatásának tárgya. A szilárdsági vizsgálatok értékelése során az anyagvizsgálók, az éles bemetszés környezetében meglepő feszültségkoncentrációkat mutattak ki.

Az anyagban megjelenő repedések, megváltoztatják a feszültségek eloszlását, és a repedéscsúcs környezetében a feszültségkoncentráció hatására következik/következhethet be a tönkremenetel.

A repedéscsúcs feszültség-problémájának elméleti és kísérleti vizsgálata a múlt században párhuzamosan folyt. Elsődlegesen a fémek vizsgálata került az érdeklődés középpontjába. A numerikus eszköztár is először lineáris elméletek segítségével közelítette a megoldást. A kutatások előrehaladtával és az is-

Dr. FEHÉRVÁRI Sándor

(1981) okl. építőmérnök (BME 2006), okl. szerkezetépítő betontechnológus szakmérnök (BME 2009), PhD (BME 2009), Adjunktus, Debreceni Egyetem Műszaki Kar Építőmérnöki Tanszékén, a BKV DBR Projekt Igazgatóság projekt menedzsere. Fő érdeklődési területe az alapúttűz természet, leírása és a szerkezetre gyakorolt hatása, speciális mély- és alagútépítés módszerek, szerkezeti- és háttérinjektálás, alagút és mélyépítési szerkezetek építéstechnológiái és utólagos javítási kérdései. Tagja a Magyar Alagútépítő Egyesületnek, a **fiib** Magyar Tagozatának, a Közlekedéstudományi Egyesületnek, a Szilikátipari Tudományos Egyesületnek és az Építéstudományi Egyesületnek.

Dr. GÁLOS Miklós

(1938) okl. építőmérnök (ÉKME 1961), acélszerkezeti szakmérnök (BME 1967), műszaki doktor (BME 1971), műszaki tudományok kandidátusa (MTA 1992), PhD (BME 1997), habilitált doktor (BME 1998), 1961-63 Győri Vagon és Gépgyár szerkesztő mérnök, 1963-78 részlettervező, irányító tervező, szakosztályvezető a VEGYTERV és OLATERV építési főosztályain. 1978-tól nyugdíjba vonulásáig a BME Építőmérnöki Karán tudományos főmunkatárs, egyetemi docens, egyetemi tanár. 1992-től a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékén ny. egyetemi tanárként vesz részt a tanszék oktatási, kutatási munkájában. Fő érdeklődési területe a közetek közetfizikai, közetmechanikai tulajdonságainak elméleti és kísérleti vizsgálatokkal történő meghatározása, az építési koanyagok minősítése. Magyarországon elsőként foglalkozott a közetek törésmechanikájával, új vizsgálati módszerek bevezetésével. A Szilikátipari Tudományos Egyesület Kő- és Kavics Szakosztályának elnöke. A Magyarhoni Földtani Társulat és a **fiib** Magyar Tagozat tagja.

Dr. Salem Georges NEHME

(1963) okl. építőmérnök (BME 1992), vasbetonépítési szakmérnök (BME 1996), PhD (BME 2005). Egyetemi docens, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laborrészleg-vezetője. Fő érdeklődési területei: Nagyszilárdságú betonok és habarcsok kutatása. Az öntömörödő betonok tartóssági és összefüggése a porozítási kérdéseinek összefüggés-vizsgálata. Az öntömörödő betonok tartóssági kérdései és összefüggése a porozítással. Betontechnológia különleges betonok területén, pl. az öntömörödő betonok tömegbetonként való alkalmazása és a felmerülő problémák (hőmérséklet-eloszlás okozta repedések) megszüntetése. Tömegbetonok minőségellenőrzése, látszóbetonok, nehéz adalékanyagokból betonok készítése, a nehézbetonok vizsgálati, másodlagos (építési -, bontási) építőanyagok újrahasznosítása, vasbeton szerkezetek megerősítése széniamellával, vasbetonszerkezetek tartóssága. Acélszál-erősítésű vasbeton lemezek átszűrődési teherbírásának növelése acélszálakkal. A **fiib** Magyar Tagozat és a Szilikátipari Tudományos Egyesület tagja.

meretek bővülésével a jelenség leírására egyre bonyolultabb matematikai modellek születtek. A lineárisan rugalmas tárcsafeladatok megoldásából a törésmechanikai alapegyenletek speciális, komplex matematikai eszközökkel történő levezetésére tett kísérletek a XX. század elején jártak először sikerrel. Kolosov 1907-ben, majd Inglis 1913-ban és Muskhelishvili 1915-ben egymástól függetlenül is komplex feszültség-függvényes megoldásokat dolgozott ki lineárisan rugalmas tárcsában lévő lyukak környezetében lévő feszültségállapot leírására. A kidolgozott megoldások előbb kör, majd ovális alakú lyukakra, előbb egy, majd néhány (nem túl sok) gyengítésre vonatkoztak ([2, 3, 4]). Egyes speciális esetekre Westergaard [5] is megadott „könnyebben” használható komplex feszültség-függvényes megoldásokat. A kétdimenziós feladatok általánosított megoldását először Sih és Rice [6] publikálta. A háromdimenziós analitikus megoldás levezetésére tett kísérletet Sneddon [7], azonban eredményeivel csak egyes speciális feladatok megoldására nyílt lehetőség.

1920-ban *Griffith* a repedéscsúcs környezetének energiaelvű megközelítését adta ([1, 8]). A minden határon túl keskenyített ellipszis (1. ábra) alakú lyuk végpontja körüli feszültségeloszlás a matematikai modellje szinguláris eredményhez (végtelen feszültségekhez) vezet a repedéscsúcsnál. Az energiaelvű megközelítés ugyanakkor egy teljesen új irányt adott a törésmechanika fejlődésének.

1. ábra Repedésmo­dell és feszültségkon­centráció *Griffith* szerint [8]
Fig. 1. Crack model and stress concentration according to *Griffith* [8]

Griffith [1] elméletével és az ezt alátámasztó kísérletekkel bebizonyította, hogy az üvegfonal szakítószilárdsága széles határok között, az átmérő függvényében 35–85 N/mm² ($d > 10$ mm) és 11 500 N/mm² ($d =$ atomiális), változhat ([1, 9]). Hasonló, nagyságrendbeli eltérésre jutott a cementkő vizsgálatánál *Jaeger és Cook* [10] is. Kutatásaik szerint a cementkő elméleti szilárdsága elérheti az 10 500 N/mm²-es értéket is, tehát a hibahelyek és egyéb gyakorlati körülmények az anyag szilárdságát az elméletileg lehetséges érték mintegy 1%-ra csökkentik!

Irwin [11], a repedéscsúcs környezetének analitikai feszültség-vizsgálatai alapján javasolta, hogy:

- Tipizáljuk a repedésfajtákat olyan módon, hogy közöttük – lineárisan rugalmas anyagi viselkedést feltételezve a szerkezetről – érvényes legyen a szuperpozíció.
- A repedéscsúcs vizsgálatára az addig alkalmazott képletek átalakításával vezessünk be új metrikát, amely anyagi jellemzőként mércéje lesz a csúcs környezetében fellépő feszültségkoncentrációnak.

Irwin tipizálási javaslata alapján az első csoportba (I-es típus) tartoznak a húzással, a másodikba (II-es típus) a nyírással, míg a harmadikba (III-as típus) a csavarással terhelt repedések (2. ábra).

2. ábra Repedés-terhelési alapesetek *Irwin* szerint [8]
Fig. 2. Crack load patterns according to *Irwin* [8]

Lineárisan rugalmas esetben így az anyagi jellemzőnek tekintett feszültségintenzitási paraméterek segítségével egy elliptikus alakú lyuk minden határon túl történő keskenyítésével (3. ábra) előálló repedéscsúcs környezetében létrejövő feszültségkoncentrációk meghatározhatók az (1) egyenlet összefüggéseivel.

3. ábra Repedéscsúcs idealizált feszültségállapota [12]
Fig. 3. Idealized stress state of a crack-tip [12]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(r, \theta) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi R}} \{ K_I f_{ij}^I(\theta) + K_{II} f_{ij}^{II}(\theta) + K_{III} f_{ij}^{III}(\theta) \}, i, j \rightarrow x, y, z \\ u_i(r, \theta) &= \frac{1}{2\mu} \sqrt{\frac{R}{2\pi}} \{ K_I g_i^I(\theta) + K_{II} g_i^{II}(\theta) + K_{III} g_i^{III}(\theta) \}, i \rightarrow x, y, z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ahol

K_I , K_{II} és K_{III} – a megfelelő repedéstípushoz tartozó feszültségintenzitási tényező

$f_{ij}^I, f_{ij}^{II}, f_{ij}^{III}$ és $g_i^I, g_i^{II}, g_i^{III}$ – a konkrét feladat terhelési és peremfeltételi viszonyai

R – repedéscsúcs sugara

λ – Lamé féle anyagállandó

A feszültségintenzitási tényező „ K ” betűje *Irwin* legközelebbi munkatársának, a laboratóriumi méréseket végző, *Kies*-nek a nevét őrzi.

A feszültségintenzitási tényezők a gyors repedésterjedéssel szembeni ellenállás mérőszámai. Feszültségintenzitási vizsgálatoknál a számítási eredményből kapott feszültségintenzitási tényezőt az anyagra jellemző kritikus feszültségintenzitási tényezővel kell összehasonlítani.

A feszültségintenzitási tényező dimenziója $\text{erő} \times (\text{hossz})^{-3/2}$ vagy $\text{feszültség} \times (\text{hossz})^{1/2}$.

Jelen cikkünkben a feszültségintenzitási paraméterek közül nem leggyakrabban vizsgált húzási, hanem – a betonok esetében – elhanyagoltabb nyírási paraméterrel foglalkozunk.

3. Betonok és egyéb kőszzerű anyagok törésmechanikai vizsgálata

3.1. Húzási (K_{IC}) feszültségintenzitási tényező meghatározása

Az eredetileg a fémekre kidolgozott próbatestekről (lásd pl. ASTM E 399-81 [13]) hamarosan kiderült, hogy kőszzerű anyagok esetén vagy az anyag rideg viselkedése, vagy a durvább szövetszerkezet miatt nem alkalmazhatóak. A már kipróbált

próbatest formák méretbeli növelésével és az anyagi viselkedéshez történő adaptálásával születtek meg a járatos, jobbára a K_{IC} feszültségintenzitási tényező meghatározását szolgáló kísérleti elrendezések (teljesség igénye nélkül lásd a 4–7. ábrán). Minden kísérleti elrendezésnél sajátos, ún. geometria függvény segítségével számítható a feszültségintenzitási tényező.

4. ábra Három pontosan hajlított bemetszett próbatest [14]
Fig. 4. Three-point bended notched specimen [14]

5. ábra Húzott, bemetszett próbatest [15]
Fig. 5. Pulled notched specimen [15]

6. ábra „Negatív V” bemetszésű próbatest (Short Rod) [16]
Fig. 6. Specimen (Short Rod) with „negative V” notch [16]

7. ábra „Saji” alakú próbatest [12]
Fig. 7. „Cheese” form specimen [12]

3.2. Nyírási (K_{IIC}) feszültségintenzitási tényező meghatározása

A nyírási (II-es típus) feszültségintenzitási tényező kritikus értékének (K_{IIC}) meghatározásához új, „kis méretű” próbatesteket vezettünk be. Felhasználva William és Birch [17] polimerekre kidolgozott húzott, félig-félig bemetszett próbatest-kialakítási ötletét (8. ábra), valamint Vutukuri és társai [18], Barragán és társai [19] betonon (9–10. ábra) és Gálos és Kövesdi [20] építőköveken végzett vizsgálatait (11. ábra.), félig-félig bemetszett, nyomott hasáb ill. henger alakú próbatesteket használtunk. Ilyen kialakítás esetén a két bemetszés közötti középső szakasz elnyíródásából határozható meg a K_{IIC} értéke.

8. ábra Húzott polimer próbatest, K_{IIC} meghatározásához [17]
Fig. 8. Pulled polymer specimen for testing K_{IIC} [17]

9. ábra Félig-félig bemetszett próbatest nyíróvizsgálata [19]
Fig. 9. Shear test of a half-half notched specimen [19]

10. ábra Nyíróvizsgálat végeeselemes modellezése (a) nyomófeszültség; b) húzófeszültség; c) nyírófeszültség eloszlása [19]
Fig. 10. FE modelling of shear test (a) compressive stress; b) tension stress; c) shear stress) [19]

11. ábra Nyíróvizsgálat építőköveken [20]
Fig. 11. Shear tests on structural stone specimens [20]

12. ábra Adalékanyagok szemeloszlási görbéje
Fig. 12. Grading curves

Mivel hasonló kialakítású próbatestekkel korábban nem végeztek ilyen jellegű vizsgálatokat, a terhelési és peremfeltételek által befolyásolt geometriai függvény sem állt rendelkezésre. Ennek meghatározásának egyik módja a kísérletekkel párhuzamosan (vagy esetleg a laboratóriumi munka teljes elhagyásával) végzett numerikus modellek vizsgálata, ahol a kialakításból eredő változók széles spektrumában lehetséges a vizsgálat. Kutatásaink során ugyanakkor a párhuzamosan elvégzett K_{IC} ill. K_{IIC} értékeket meghatározó vizsgálatok eredményei közötti összefüggés felhasználásával javasoltunk paramétereket a geometriai függvényre. Gálos [21] javaslata alapján a K_{IIC}/K_{IC} hányadost 1,15 értékűnek választottuk.

13. ábra Bemetszett, 70x70x250 mm élhosszúságú hasáb elvi kialakítása
Fig. 13. Schematic shape of a notched beam, measured 70x70x250 mm

14. ábra Bemetszett, 60 mm átmérőjű, félbevágott henger elvi kialakítása
Fig. 14. Schematic shape of a notched halved cylinder, diameter 60 mm

15. ábra Bemetszett, 60 mm átmérőjű, félbevágott henger elvi kialakítása
Fig. 15. Schematic shape of a notched halved cylinder, diameter 100 mm

A referencia, húzási (I-es típusú) feszültségintenzitási tényező kritikus értékének (K_{IC}) változását vizsgáltuk bemetszett, hárompontosan hajlított hasáb, illetőleg szintén bemetszett félhenger alakú próbatesteken. Míg a bemetszett hasáb a leggyakoribb vizsgálati elrendezés beton (kő) anyagok vizsgálatához, a hosszában félbevágott henger kifejezetten a magfúróval történő mintavétel során nyert beton (kő) minták vizsgálatához ideális. Utóbbi próbatestek vizsgálatát és elemzését Gálos, Bojtár és Rechterisz végezte el ([22, 23, 24]).

Kutatásunkban vizsgáltuk továbbá az acélszál-erősítés hatását is. A próbatesteket, illetve a próbatestek bemetszéseit vágással alakítottuk ki. Erdélyi és Gálos [25] kutatásai során, töb-

bek között, rámutattak, hogy a vágással készített, valamint a speciális zsaluzat alkalmazásával kialakított, acélszál-erősítésű beton próbatestek törésmechanikai paraméterei (azonos kialakítás és geometriai méretek mellett) közel azonosnak voltak.

16. ábra Félíg bevágott, 70x70 mm alapú hasáb elvi kialakítása
Fig. 16. Schematic shape of a half notched prism

17. ábra Félíg bevágott, 60 mm átmérőjű henger elvi kialakítása
Fig. 17. Schematic shape of a half notched cylinder, diameter 60 mm

18. ábra Félíg bevágott, 100 mm átmérőjű henger elvi kialakítása
Fig. 18. Schematic shape of a half notched cylinder, diameter 100 mm

4. Kísérleti betonösszetételek és vizsgálati módszerek

4.1. Betonösszetétel, frissbeton vizsgálatok

A kísérletsorozatban *hat* receptúra összeállításával vizsgáltuk a szokványos és különleges betontechnológiai paraméterek és összetevők megváltoztatásának hatását. A vizsgálatok során változtattuk a beton víz-cement tényezőjét (a cementadagolás megváltoztatása mellett azonos szinten tartott vízadagolással), az acélszál-adagolást, valamint egy esetben az alkalmazott adalékanyag fajtáját. Mindenkor állandó paraméter volt a cement típusa (CEM I 42,5 R, Holcim) és a maximális szem nagyság ($d_{max} = 16$ mm). A beton konzisztenciáját BASF Glenium 51 folyósítószer adagolásával szabályoztuk. A betonösszetételek állandó és változó kísérleti paramétereit az 1. táblázat tartalmazza.

Az adalékanyagok összeállítása során törekedtünk arra, hogy a két, eltérő anyagból (kvarckavics és -homok, ill. bazalt) összeállított frakcióknak közel azonos finomsági modulusa és szemeloszlási görbéje legyen. Az összetétel tervezése során az A és B határgörbék közötti tartomány felezőgörbéjét közelítettük (12. ábra). A keveréskor elvégeztük a szokásos frissbeton vizsgálatokat (frissbeton testsűrűség és hőmérséklet-mérése, konzisztencia meghatározása területtel, légtartalom számítása). A K4 és K5 receptúráknál, a pépmennyiség változtatása nélkül adagolt acélszálak hatására a frissbeton légtartalma 20 ℓ/m^3 -ról 28, ill. 35 ℓ/m^3 -re növekedett.

		Receptúra jele		
		K1–K3	K4–K5	K6
Kísérleti állandó	adalékanyag	kvarckavics és -homok $d_{\max} = 16 \text{ mm}$ finomsági modulus $m = 6,01$		változó
	cementadagolás	változó	400 kg/m ³	
	vízadagolás		~170 l/m ³	
	víz/cement tényező	változó	0,43	
Kísérleti változó	adalékanyag	állandó		bazalt (minden frakció) $d_{\max} = 16 \text{ mm}$ $m = 6,08$
	cementadagolás	35–450 kg/m ³	állandó	
	víz/cement tényező	0,5–0,43–0,38	állandó	
	acélszál adagolás	állandó	0,5–1,0 V/V%	állandó

1. táblázat Betonösszetételek
Table 1. Mix design and variables

19. ábra Bemetszett, 70×70×250 mm élhosszúságú hasáb hajlító-húzóvizsgálata
Fig. 19. Bending test of a notched beam, measure 70×70×250 mm

20. ábra Bemetszett, 100 mm átmérőjű, félbevágott henger hajlító-húzóvizsgálata
Fig. 20. Bending test of a notched, halved cylinder, diameter 100 mm

21. ábra Bemetszett, 70×70 mm alapú hasáb nyíróvizsgálata
Fig. 21. Shear test of a 70×70 mm prism

22. ábra Elnyírt próbatest
Fig. 22. Sheared specimen

23. ábra Bemetszett, 60 mm átmérőjű henger nyíróvizsgálata
Fig. 23. Shear test of a notched cylinder, diameter 60 mm

4.2. Próbatestek

A bevágásokkal és bemetszésekkel készített próbatestek elvi kialakítását a 13–18. ábrán adtuk meg. A vágások szélessége azonos, a vágókorong szélessége szerinti érték. A bemetszés mélysége minden esetben az adott próbatest bemetszési síkban, a repedésterjedés irányában mért legnagyobb vastagságának 20%-a volt. A tényleges terhelési elrendezéseket a 19–23. ábra mutatja.

Utószó

K_{IIC} feszültségintenzitási tényező számításához szükséges geometriai függvény meghatározásával, valamint a kísérleti eredmények kiértékelésével a cikksorozat következő részében foglalkozunk.

Részletes hivatkozásjegyzék a cikksorozat befejező, II. része után található.